

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛУМИНА ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СОСТАВА,
ПОДВЕРГНУТОГО ИОННО-ЭЛЕКТРОННО-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ**М.Е. Рыгина^{1,2}, А.Д. Тересов², В.В. Шугуров²Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Ю.Ф. Иванов^{1,2}¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр-т Ленина, 30, 634050

²Институт сильноточной электроники СО РАН

Россия, г. Томск, пр-т. Академический, 2/3, 634055

E-mail: L-7755me@mail.ru

**MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE HYPEREUTECTIC SILUMIN PROCESSED BY ION-
ELECTRON-PLASMA MODIFICATION**M.E. Rygina¹, A.D. Teresov², V.V. Shugurov²Scientific Supervisor: Prof., Dr. Yu.F. Ivanov^{1,2}¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050²Institute of High Current Electronics SB RAS, Russia, Tomsk, Academic str., 2/3, 634055

E-mail: L-7755me@mail.ru

Abstract. *In this paper, the possibility of modifying the surface of a hypereutectic silumin (Al-(18-24) wt.%Si) is shown. Modification of the samples was carried out in two stages. At the first stage, a "film (Zr-5% Ti-5% Cu) / (Al- (18-24) wt.% Si) film system was formed by an ion-plasma method with an arc-sputtering of a Zr-5% Ti-5% cathode % Cu in the "TRIO" installation (IHCE SB RAS). In the second stage, the surface layer of the silumin of the hypereutectic composition was doped by melting the "film-substrate" system with an intense pulsed electron beam at the "SOLO" installation.*

Введение. Силумин перспективный материал для изготовления подшипников и поршней. На данный момент в промышленности преимущественно применяются силумины с составом, близким к эвтектическому, то есть содержание кремния в которых изменяется в пределах (11-13) вес.%. Использование заэвтектических силуминов оправдано высокой твердостью, за которую отвечает кремний. Как было показано в работе [1], твердость силумина увеличивается пропорционально концентрации в сплаве кремния. Негативным фактором заэвтектических силуминов, существенно ограничивающих их более широкое применение в промышленности, является присутствие в структуре крупных (десятки-сотни микрометров) включений кремния и большое количество микропор. Преимущественно по этим причинам использование деталей, изготовленных из заэвтектического силумина сразу после отливки, не представляется возможным.

Цель настоящей работы – выявление возможности повышения механических (микротвердость) и трибологических (износостойкость) свойств заэвтектического силумина ионно-электронно-плазменными методами.

Материалы и методы исследования. Образцы заэвтектического силумина с содержанием кремния 18-24 вес. % имели форму цилиндра высотой 5 мм, диаметром 30 мм. На первом этапе на установке «ТРИО» [2] наносили пленку состава Zr-5%-Ti-5%Cu (толщина пленки 0,5 мкм). На втором

этапе система «пленка (Ti-Zr-Cu) / (Al-(18-24) вес. % Si) подложка» подверглась обработке интенсивным импульсным электронным пучком (установка «СОЛО» [3]). Режимы облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 20-40 Дж/см², частота следования импульсов 0,3 с⁻¹, длительность воздействия пучка электронов 200 мкс, число импульсов воздействия 20. Режим облучения выбран согласно тепловым расчетам [4,5]. Образцы исследовали методами оптической (μ Vizo-MET-221) и электронной сканирующей (SEM-515 Philips) микроскопии. Испытания на твердость осуществляли на установке ПМТ-3. Исследования износостойкости силумина проводилось в геометрии диск-штифт при комнатной температуре и влажности на установке TRIBOtechnik. Объем износа материала определялся после проведения профилометрии образовавшегося трека.

Результаты и их обсуждение. Структура образцов силумина в исходном состоянии представлена зернами эвтектики Al-Si, включениями первичного кремния, размер которых достигает 100 мкм, а также включениями интерметаллидов. Выявлено большое количество микропор. Твердость образцов в зависимости от количества кремния варьируется от 890 МПа до 1090 МПа и увеличивается с ростом концентрации кремния (таблица 1). Износостойкость образцов в зависимости от концентрации кремния изменяется немонотонным образом (таблица 1), что, очевидно, обусловлено неоднородным распределением присутствующих в материале зерен кремния, обладающих повышенной хрупкостью.

Таблица 1

Твердость и износостойкость исходных образцов заэвтектического силумина (18-24 вес. % Si)

| Концентрация кремния, вес.% | Твердость, МПа | Скорость износа, 10 ⁻⁴ , мм ² /Н*м |
|-----------------------------|----------------|--|
| 18-20 | 890 | 3,1 |
| 20-22 | 970 | 1,9 |
| 22-24 | 1090 | 5,5 |

Пленка Zr-Ti-Cu, сформированная при электродуговом распылении катода состава Zr-5% Ti-5%Cu, характеризуется наличием микрокапельной фракции (рис. 1, а).

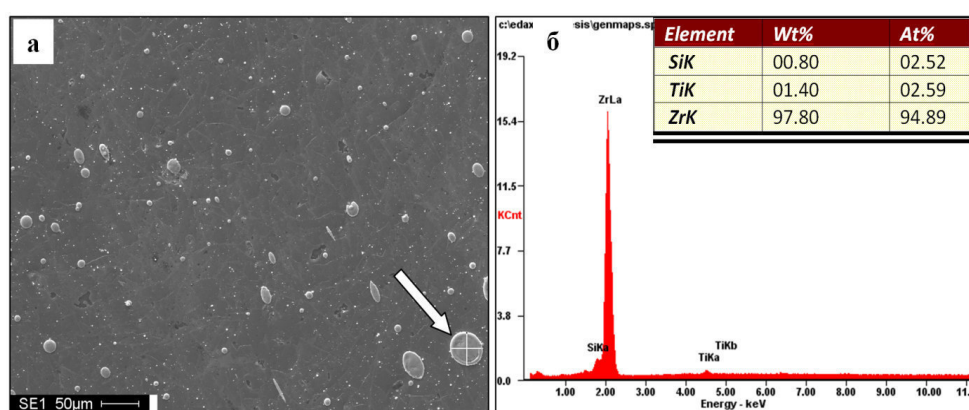


Рис.1. Структура пленки Zr-Ti-Cu (а) и энергетические спектры (б), полученные с капли, указанной на (а) стрелкой. Подложка – силумин состава Al-(22-24) вес. % Si.

Методами микрорентгеноспектрального анализа показано, что капли состоят преимущественно из атомов циркония (рис. 1, б). После обработки системы «пленка (Zr-Ti-Cu) / (Al-(18-24) вес. %) Si) подложка» интенсивным импульсным электронным пучком на поверхности модифицирования

наблюдается структура высокоскоростной кристаллизации, представленная кристаллитами, размер которых (0,5-1) мкм.. Толщина модифицированного слоя колеблется в пределах от 100 мкм до 150 мкм и определяется режимом облучения. Выполнены механические испытания и выявлено кратное (в 3,7-5,5 раз) увеличение микротвердости модифицированных образцов относительно образцов в литом состоянии. Установлено, что микротвердость облученных образцов зависит как от концентрации кремния в силумине, так и от плотности энергии пучка электронов. Обнаружено, что с увеличением содержания кремния микротвердость поверхностного слоя облученного силумина снижается от 4837,1 МПа (30 Дж/см², 200 мкс, 20 имп.) для сплава Al-(18-20 вес. %) Si до 4026,5 МПа (20 Дж/см², 200 мкс, 20 имп.) для сплава Al-(22-24 вес. %) Si. Проведены трибологические испытания и выявлено кратное (в 2,6-1,8 раз) увеличение износостойкости модифицированных образцов относительно образцов в литом состоянии. Установлено, что износостойкость облученных образцов увеличивается с ростом концентрацией кремния в силумине и слабо зависит от плотности энергии пучка электронов в указанном интервале величин. Так при параметрах пучка электронов 40 Дж/см², 200 мкс, 20 имп. износостойкость облученного образца силумина с концентрацией кремния (18-20) вес. % превышает износостойкость литого состояния в 1,8 раза, а при концентрации кремния (22-24) вес. % – в 2,6 раза.

Заключение. Выявлена возможность увеличения механических (микротвердость) и трибологических (износостойкость) характеристик заэвтектического силумина с содержанием кремния, изменяющегося в пределах от 18 вес. % до 24 вес. %. Показано, что при облучении системы «пленка (Zr-Ti-Cu) / (Al-(18-24 вес. %) Si) подложка» максимальная твердость модифицированного поверхностного слоя наблюдается у сплава Al-(18-20 вес. %) Si и превышает твердость литого состояния в 5,5 раз; максимальная износостойкость наблюдается у сплава Al-(22-24 вес. %) Si и превышает износостойкость литого состояния в 2,6 раза. Соответственно полученным результатам наиболее перспективным к использованию материалом является силумин с содержанием кремния 18-20 вес. %, при облучении которого удается достичь высоких значений как твердости, так и износостойкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gracheva M. E., Ivanov Y. F., Laskovnev A. P., Teresov A. D., Cherenda N. N., Uglov V. V., Petrikova E. A., Astashinskaya M. V. Modification of the sample's surface of hypereutectic silumin by pulsed electron beam // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2016 - Vol. 124, Article number 012138. - p. 1-5.
2. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / под общ. ред. Н.Н. Коваля и Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 304 с.
3. Коваль, Н. Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // Известия вузов. Физика. -2008. - Т. 51. - № 5. - С. 60-70.
4. Yurii F. Ivanov, Olga V. Krygina, M. Rygina, E. A. Petrikova, A. D. Teresov, V. V. Shugurov, O. V. Ivanova, I. A. Ikonnikova Combined modification of aluminum by electron-ion-plasma methods // High Temperature Material Processes 2014, 18, №4 311-317.
5. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / Под общ. ред. Н.Н. Коваля и Ю.Ф. Иванова - Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 312 с.